

IAHR

AIIH

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018****ANÁLISE PRELIMINAR DO ALCANCE DE REMOÇÃO DE SEDIMENTOS  
POR DESCARREGADORES DE FUNDO EM PEQUENAS BARRAGENS**

***Aline Saupe Abreu<sup>1</sup>, Vinicius Lima de Oliveira<sup>2</sup>, Pietro Gabriel Ramos Cunico<sup>2</sup>, Pedro Luis Bernardi de Camargo, Rute Ferla<sup>2</sup>, Carlos Barreira Martinez<sup>3</sup>, Luiz Augusto Magalhães Endres<sup>2</sup>, Daniela Guzzon Sanagiotto<sup>2</sup>, Mauricio Dai Prá<sup>2</sup>, Eder Daniel Teixeira<sup>2</sup>, Marcelo Giulian Marques<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas (UFPel)-Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos,

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)- Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), <sup>3</sup> Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, [alsaupe@gmail.com](mailto:alsaupe@gmail.com), [oliveira.vinicius@ufrgs.br](mailto:oliveira.vinicius@ufrgs.br), [pietro.cunico@ufrgs.br](mailto:pietro.cunico@ufrgs.br), [pedroluisbernardidecamargo@gmail.com](mailto:pedroluisbernardidecamargo@gmail.com), [ruteferla@gmail.com](mailto:ruteferla@gmail.com), [endres@ufrgs.br](mailto:endres@ufrgs.br), [dsanagiotto@ufrgs.br](mailto:dsanagiotto@ufrgs.br), [mdaipra@gmail.com](mailto:mdaipra@gmail.com), [eder.teixeira@ufrgs.br](mailto:eder.teixeira@ufrgs.br), [mmarques@iph.ufrgs.br](mailto:mmarques@iph.ufrgs.br), [cmartinez@unifei.edu.br](mailto:cmartinez@unifei.edu.br)

**RESUMO:**

O presente artigo apresenta algumas das análises preliminares desenvolvidas no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) visando a compreensão dos mecanismos de funcionamento e remoção de sedimentos através da utilização de descarregadores de fundo em pequenas barragens (com altura inferior a 15 m). Desta forma, foi avaliado, por meio de um modelo físico experimental, o alcance da remoção de sedimentos no reservatório quando acionada a estrutura do descarregador de fundo, bem como, a compreensão desses resultados quando aplicadas as diferentes equações de previsão presentes na literatura. Considerando os resultados obtidos em laboratório definiu-se novos parâmetros adimensionais, de maneira a, generalizar o comportamento do processo de remoção de sedimentos. Os dados obtidos experimentalmente, quando comparados aos resultados dos diferentes autores, apresentaram a mesma concordância, porém pode-se constatar a necessidade de inserção de novos parâmetros adimensionais que considerem a massa específica do material a ser removido e/ou a velocidade do escoamento no interior da descarga de fundo.

**ABSTRACT:**

The present article composes some of the preliminary analyzes developed in the Laboratory of Hydraulic Constructions (LOH) of the Institute of Hydraulic Research (IPH) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) aiming the comprehension of the mechanisms of operation and sediment removal through the use of bottom outlet in small dams. In this way, it was evaluated by means of an experimental physical model the range of sediment removal in the reservoir when the bottom outlet structure was activated, as well as the comprehension of these results when applied to the different equations of prevision present in the literature. Considering the results obtained in the laboratory new dimensionless parameteres were defined in order to generalize the behavior of the sediment removal process. The data extracted, when compared to the results of the different authors, presented the same concordance but it is possible to verify the necessity of insertion of new dimensionless parameters that consider the specific mass of the material to be removed and/or flow velocity inside the bottom outlet.

**PALAVRAS CHAVES:** Remoção de sedimentos, descarregadores de fundo, Pressure flushing, análise experimental, modelo reduzido,

## INTRODUÇÃO

Usinas hidrelétricas (UHE's) são importantes fontes de energia no mundo, e no Brasil são responsáveis por cerca de 65% da capacidade de oferta de energia elétrica do país, segundo o Ministério de Minas e Energia, (EPE, 2015). A inserção de barragens ao longo de cursos d'água propiciam a deposição de sedimentos e, conseqüentemente, o processo gradativo e inerente de assoreamento em seus reservatórios, tornando-se responsável pela redução da capacidade de armazenamento de água e da vida útil desses empreendimentos.

Batuca e Jordaan Jr. (2000) verificaram através de informações e dados de 127 reservatórios onde o processo de assoreamento ocorreu entre o 2º e 74º anos após a construção das barragens, que a redução da capacidade de volume útil pode variar de 0,3% a 100%, tornando-se um dos principais fatores preponderantes aos custos de viabilidade de projeto na construção de UHE's. Regiões do Brasil onde foram construídas usinas hidrelétricas que dispõem de grandes reservatórios, tais como as usinas de Itaipu, Itá, Sobradinho e Tucuruí, demandam maiores períodos para seu total assoreamento. Sendo a perda de sua capacidade de armazenamento estimada em 0,5%/ano avalia-se uma vida útil superior a 1.000 anos, segundo Oliveira et al.(2000).

A remoção dos depósitos de sedimentos pode ser realizada por diferentes maneiras: de forma mecânica por meio de dragagem, altamente oneroso ao operador do sistema, ou por meio de métodos hidráulicos que consistem basicamente na inserção de orifícios denominados de descarregadores de fundo que, incorporados ao paramento de montante da barragem, geralmente na parte inferior do volume útil do reservatório, permitem a retirada de material por meio da capacidade de arraste do escoamento. Com o objetivo de avaliar a eficiência dessas estruturas hidráulicas na fase de projeto, torna-se necessário o conhecimento e a posterior predição do alcance e das dimensões da “fossa” ou “cone” de depressão gerado durante o acionamento dos descarregadores em relação a tomada de água presente nos barramentos de geração de energia ou reservação de água.

Estudos referentes ao dimensionamento dos descarregadores de fundo e ao posicionamento destas estruturas hidráulicas em relação ao maciço e a tomada de água em reservatórios são extremamente escassos na literatura. Atualmente, são verificados por diferentes autores, Meshkati et al. (2010), Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013), Fathi-Moghadam et al. (2010), Emamgholizadeh e FathiMoghadam (2014), dentre outros, a relação da estimativa do alcance de remoção de sedimentos por meio de descarregadores de fundo específicos a modelos, porém a definição de diretrizes de funcionamento referentes a protótipos ainda carece de pesquisas e estudos na área da engenharia/sedimentos.

Desta forma, este artigo visa apresentar os resultados preliminares obtidos a partir de um modelo físico experimental desenvolvido no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em especial, na identificação do alcance da remoção de sedimentos por meio de descarga de fundo instalada no paramento de pequenas barragens (com altura inferior a 15 m) e em reservatório de nível d'água constante. Os resultados apresentados compõem uma das etapas desenvolvidas no projeto de pesquisa intitulado: “Produtos e Processos para Avaliação do Aporte de Sedimentos Visando à Disponibilidade Hídrica em Reservatórios de Geração de Energia”, com o apoio da Financiadora de Estudos e Pesquisas (FINEP), UFRGS, IPH/LOH e UFPel.

## REFERENCIAL TEÓRICO

Os descarregadores de fundo podem ser operados em condições distintas de acionamento, tendo influência direta na conformação de fundo assumida pelo depósito de sedimentos e nas condições hidráulicas do escoamento a montante da estrutura de remoção. Morris e Fan (1992) e Talebbeydokhti e Naghshineh (2004) apresentam as condições denominadas de *Pressure Flushing* a situações que contemplam a operação da descarga de fundo em condições de uniformidade do

escoamento, sob pressão e sem o rebaixamento do nível de água do reservatório e *Drawdown Flushing* para condições hidráulicas de remoção sedimentos em conjunto com o rebaixamento total nível de água do reservatório. Brandt (2000) define ainda como *Sluicing* o acionamento da descarga de fundo realizada somente em eventos hidrológicos de cheias, ou seja, sem o rebaixamento de montante do reservatório e durante variações de velocidades no escoamento através da estrutura de remoção de sedimentos.

O método hidráulico de funcionamento mais utilizado em barreagens com pequenos reserservatórios, segundo Meshkati et al. (2009), é o *Pressure Flushing*, sendo este tipo de acionamento, sob pressão e sem rebaixamento do nível de água estudado por diversos autores no mundo. Meshkati et al. (2010), Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013), Fathi-Moghadam et al. (2010) e Emamgholizadeh e FathiMoghadam (2014), conforme descrito na Tabela 1, apresentam equações para a estimativa do alcance da remoção de sedimentos via descarregadores de fundo, todas desenvolvidas através da análise e predição do comprimento máximo ( $L_{sm\acute{a}x}$ ) atingido pelo cone de depressão após o acionamento dessas estruturas.

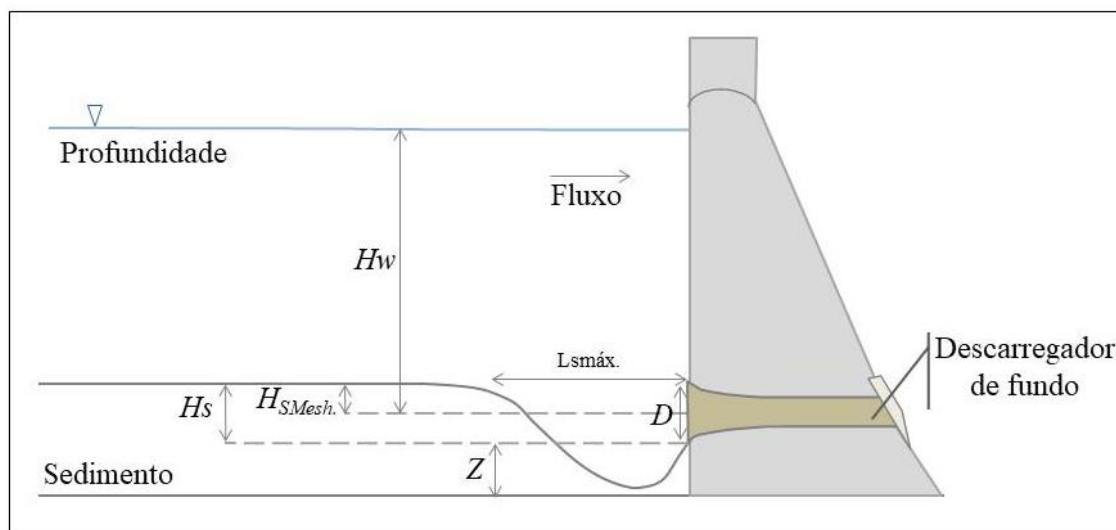
Estudos realizados por Emamgholizadeh et al. (2006) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) evidenciam, ainda, as variações do diâmetro do cone de depressão diretamente relacionado com o  $L_{sm\acute{a}x}$ , atingido na nova conformação de fundo, com o nível de lâmina de água acima dos sedimentos depositados. Saraiva et al. (2017) também realizou comparações de seus resultados com as equações de estimativa propostas pelos autores citados acima, servindo de subsídio para a análise apresentada neste artigo. Algumas das equações expressas na literatura consideram em suas formulações a massa específica do material a ser removido e a velocidade do fluxo próximo ao descarregador de fundo, não sendo um parâmetro generalizado a todas as relações estabelecidas.

**Tabela 1:** Equações encontradas na literatura para previsão do comprimento máximo de remoção do sedimento ( $L_{sm\acute{a}x}$ ), conforme SARAIVA et al. (2017).

Autor	Equação	Observação
Meshkati et al. (2010)	$\frac{L_{sm\acute{a}x}}{H_w} = 0,031 \cdot Fr_{outlet}^{0,104} \cdot \left( \frac{H_{sMeshkati}}{H_w} \right)^{0,733} \cdot \left( \frac{A_D}{H_w^2} \right)^{0,146}$	Q = 0,15 a 14 L/s H <sub>w</sub> = 36,66 e 96 cm D = 1", 2", 3" d <sub>s</sub> = 1 mm ρ <sub>s</sub> = 1800 kg/m <sup>3</sup> (sílica)
Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013)	$\frac{L_{sm\acute{a}x}}{H_{wMeshkati}} = 1,98 \cdot \left( \frac{H_{sMeshkati}}{H_w} \right)^{0,895} \cdot \left( \frac{u}{(g \cdot H_w)^{0,5}} \right)^{0,143}$	Características não informadas
Fathi-Moghadam et al. (2010)	$\frac{L_{sm\acute{a}x}}{D} = 8,19 \cdot \left( \frac{H_w}{H_s} \right)^{-0,033} \cdot \left( \frac{u}{\sqrt{g \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \cdot d_{50}}} \right)^{0,10}$	Q = 1 a 8 L/s H <sub>w</sub> =52, 90, 1,20 cm D = 1", 2" e 3" H <sub>s</sub> = 42cm d <sub>50</sub> = 0,27; 0,42 e 1,2mm ρ <sub>s</sub> = 2650 kg/m <sup>3</sup>
Emamgholizadeh e FathiMoghadam (2014)	$\frac{L_{sm\acute{a}x}}{D} = 0,33 \cdot \left( \frac{H_s}{H_w} \right)^{0,40} \cdot \left( \frac{\rho_{wb} - \rho_w}{\rho_w} \right)^{-1,44}$	Q = 1 a 8 L/s H <sub>w</sub> = 52, 90, 1,20 cm D = 1", 2" e 3" H <sub>s</sub> = 42 cm d <sub>s</sub> = 0,007mm ρ <sub>wb</sub> = 1230 a 1405kg/m <sup>3</sup>

Onde:

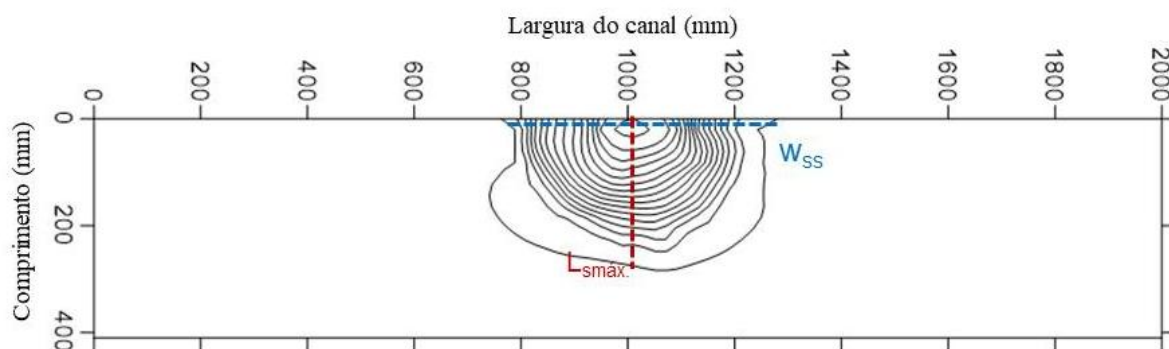
$Q$ : Vazão de saída pela descarga ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A_D$ : Área do orifício da descarga de fundo ( $\text{m}^2$ );  $H_W$ : Altura da lâmina d'água acima do depósito de sedimentos (m);  $H_S$ : Altura do depósito de sedimentos (m);  $H_{w\text{Meshkati}}: H_W - \frac{D}{2}$ ;  $H_{s\text{Meshkati}}: H_S - \frac{D}{2}$ ;  $d_s$ : Diâmetro médio da partícula (m);  $\rho_s$ : Massa específica dos sedimentos ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\rho_w$ : Massa específica da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$ : Aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $D$ : Diâmetro da descarga de fundo (m);  $u$ : Velocidade média do escoamento no orifício ( $\text{m}/\text{s}$ );  $\mu$ : Viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $Fr_{\text{outlet}}$ : Número de Froude (adm) a montante de descarga de fundo considerando o parâmetro  $D$  e  $u$ ;  $Z$ : Altura de sedimento abaixo da geratriz inferior da descarga de fundo (m); e  $L_{\text{smáx}}$ : Comprimento máximo de remoção do sedimento (m).



**Figura 1.** -Desenho esquemático das dimensões analisadas. Fonte: Autores (2018).

Na Figura 1 são ilustradas as dimensões analisadas no presente estudo, assim como a localização dos comprimentos máximos ( $L_{\text{smáx}}$ ), relacionados às equações propostas na Tabela 1, que definem o avanço da cava (cone de depressão) em direção a montante do empreendimento. Os estudos desenvolvidos por Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) e Saraiva et al. (2017) confirmam a semelhança da forma da cava à geometria de um semicírculo de raio equivalente ao avanço do cone de depressão ou seja, ao  $L_{\text{smáx}}$ .

Na Figura 2 é apresentado em um desenho esquemático de um cone de depressão formado a partir de uma descarga de fundo com diâmetro “D”, instalada no centro do paramento de uma barragem. Indica-se, também, o comprimento de remoção ( $L_{\text{smáx}}$ ) e a distância estabelecida entre pontos de mesma cota em direção as margens ( $W_{ss}$ ), ou seja, a largura do cone de depressão.



**Figura 2.** -Desenho esquemático das relações de formato da “fossa” ou “cava” gerada após a remoção de sedimentos, a partir das dimensões  $L_{\text{smáx}}$  e  $W_{ss}$ . Fonte: Autores (2018).

Considerando as principais variáveis que influenciam no processo de remoção de sedimentos através dos descarregadores de fundo, conforme Equação 1 apresentada por Saraiva et al. (2017), foram determinados os alcances máximos de remoção de material de fundo no sentido do escoamento ( $L_{smáx}$ ) por meio do desenvolvimento de adimensionais que melhor representam a formação final do cone de depressão.

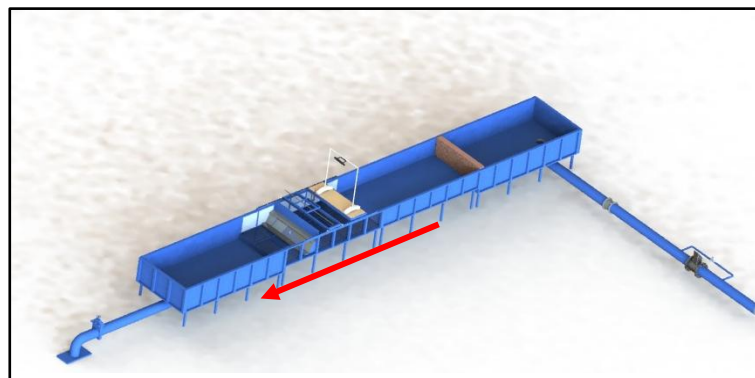
$$f(u, \rho_w; g; d_s; \rho_s; H_W; D; v; Z; L_{smáx}; H_s) = 0 \quad [1]$$

Onde:

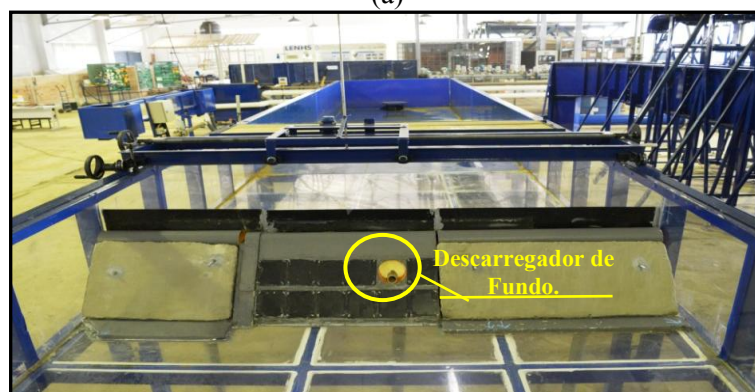
$u$ : é a velocidade do escoamento (m/s);  $\rho_w$  é a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>);  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  $d_s$  é o diâmetro médio do sedimento (m);  $\rho_s$  é a massa específica do sedimento (kg/m<sup>3</sup>);  $H_W$  é a carga hidráulica total acima do centro do orifício (m);  $D$  é o diâmetro do orifício (m);  $v$  é a velocidade média do escoamento (m/s);  $Z$  é a cota máxima de sedimentos a partir da geratriz inferior do orifício (m);  $L_{smáx}$  é o comprimento máximo de remoção do sedimento (m);  $H_s$  é a altura máxima do depósito de sedimentos (m).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um modelo físico experimental com o objetivo de simular as condições hidráulicas de contorno e a dinâmica de remoção de sedimentos via descarregadores de fundo instalados em um paramento de barragem. O modelo físico é composto por um canal metálico de declividade nula, com dimensões de 16 m de comprimento, 2 m de largura e 0,80 m de altura. Neste canal foi implantado um paramento (barragem) de 0,6 m de altura e 2 m de comprimento, onde localizam-se os descarregadores de fundo, conforme Figura 3.



(a)



(b)

**Figura 3.** -Desenho esquemático do canal metálico e das estruturas do modelo físico final, a seta vermelha indica a direção do fluxo do escoamento (a); Vista de jusante do modelo e dos descarregadores de fundo incorporados ao paramento da barragem de concreto, (b). Fonte: Autores (2017).



Os descarregadores de fundo foram construídos utilizando-se tubos de P.V.C. nos diâmetros nominais de DN 33, 50, 75 e 100 mm, as vazões de ensaio variaram de 1,0 a 12,6 l/s de acordo com o diâmetro definido. A geratriz inferior do orifício, com relação ao diâmetro nominal de 100 mm, utilizado foi posicionada a uma altura de 0,17 m do fundo do canal, próximo ao centro do paramento da barragem, considerando sua largura total de 2,0 m. O material utilizado como sedimento foram grânulos de borracha processada, que possuem massa específica ( $\rho_s$ ) de 1080 kg/m<sup>3</sup> e diâmetro de partícula médio de aproximadamente 1 mm.

As características dos ensaios realizados no modelo físico experimental dos descarregadores de fundo são apresentadas na Tabela 2. Para as diferentes vazões a altura do depósito de sedimentos ( $H_s$ ) foi mantida constante em 0,13m de altura.

Tabela 2: Características dos ensaios realizados no modelo físico-experimental dos descarregadores de fundo LOH.

DN (mm)	Q(l/s)	Hw (m)
33	1,00	0,222
33	1,20	0,290
33	1,40	0,399
50	2,00	0,174
50	2,47	0,235
50	2,90	0,312
50	3,00	0,351
75	5,85	0,247
75	6,00	0,278
75	6,48	0,303
75	6,96	0,345
75	8,30	0,387
100	10,30	*
100	11,10	0,246
100	12,61	0,269
100	13,50	0,274
100	14,00	0,324

\*: Erro de leitura

Foram determinados os principais grupos adimensionais que influenciam no processo de remoção de sedimentos, em condições hidráulicas de *Pressure Flushing*, através de descarregadores de fundo, a partir da aplicação do teorema de  $\pi$ 's de *Vaschy-Buckingham*. Os adimensionais foram reagrupados, resultando em novos adimensionais adequados as condições de ensaios realizadas. Considerando os equacionamentos propostos por Meshkati et al. (2010), Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013), Fathi-Moghadam et al. (2010) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) obteve-se a estimativa dos comprimentos máximos teóricos ( $L_{sm\acute{a}x}$ ) característicos de cada ensaio realizado em laboratório, referentes aos diâmetros de 33, 50, 75 e 100mm das estruturas hidráulicas de remoção.

Definidos os  $L_{sm\acute{a}x}$  teóricos através das equações dispostas pelos diferentes autores foram aplicados os adimensionais  $\pi_L$  e  $\pi_Z$  aos novos comprimentos extraídos a partir das características hidrodinâmicas do escoamento e das conformações de fundo, em diferentes altitudes e alcances de remoção das fossas formadas.

## RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos experimentalmente no modelo reduzido foi possível observar que as conformações de fundo assumidas pelos depósitos de sedimentos após o acionamento dos descarregadores de fundo são as mesmas verificadas por Emamgholizadeh et al. (2006), Meshkadi et al. (2016) e Saraiva (2017), sendo o parâmetro de forma da “fossa” ou “cava” um fator independente das diferenças gerais do tipo de material, da altura de lâmina d’água ou mesmo da geometria dos descarregadores de fundo entre estes autores, conforme Figura 4.



**Figura 4.** -Foto das conformações de fundo geradas pelos descarregadores de fundo nos DN’s de 33mm (a) e 100mm(b), respectivamente. Fonte: LOH/UFRGS (2018).

As relações entre as dimensões de largura da fossa ( $W_{ss}$ ) e os comprimentos do alcance de remoção máximos ( $L_{smáx.}$ ) expressam, de fato, semelhanças geométricas entre si, apresentando somente alterações dimensionais de seus avanços quando alterados os diâmetros das descargas de fundo, em condições de funcionamento de *Pressure Flushing*. Independentemente das vazões de ensaio e dos diâmetros dos descarregadores de fundo utilizados, a forma do cone de depressão se estabelece como um semi-círculo, influenciado pela altura de lâmina de água acima da geratriz inferior do descarregador de fundo ( $H_w$ ).

Desta forma, considerando as principais variáveis que representam o fenômeno de remoção de sedimentos (equação 1) para os dados adquiridos no experimento, foram desenvolvidos adimensionais que buscassem generalizar o comportamento da conformação de fundo obtendo assim, os parâmetros adimensionais expressos na Equação 2 e na Equação 3.

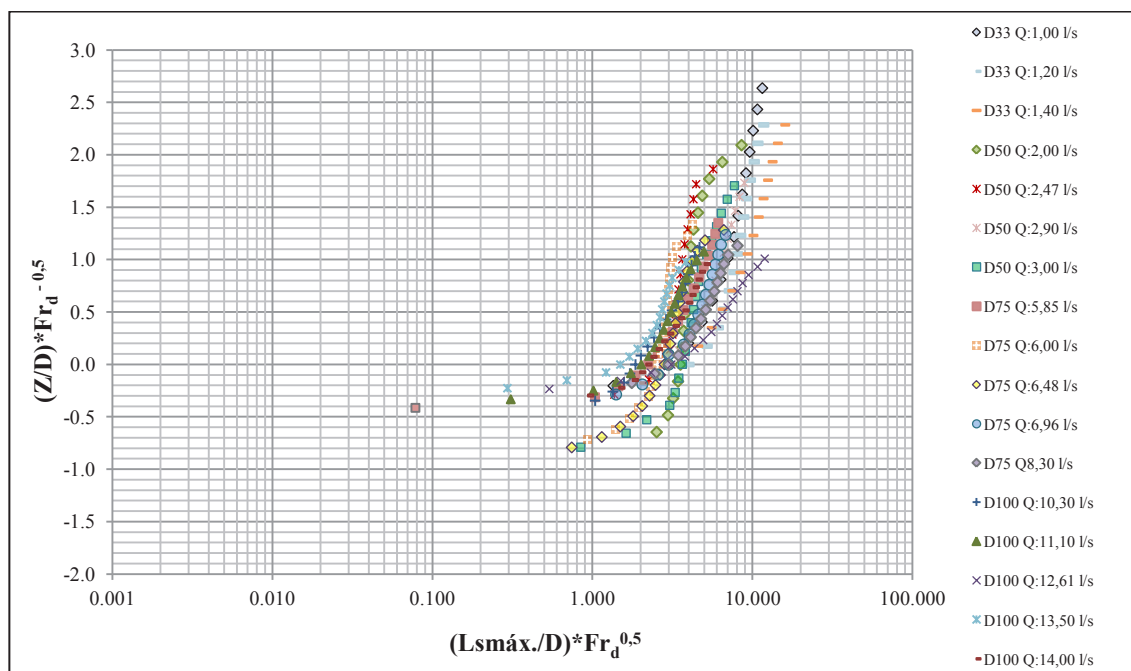
$$\pi_L = (L_{smáx.}/D) \times Fr_d^A \quad [2]$$

$$\pi_Z = (Z/D) \times Fr_d^B \quad [3]$$

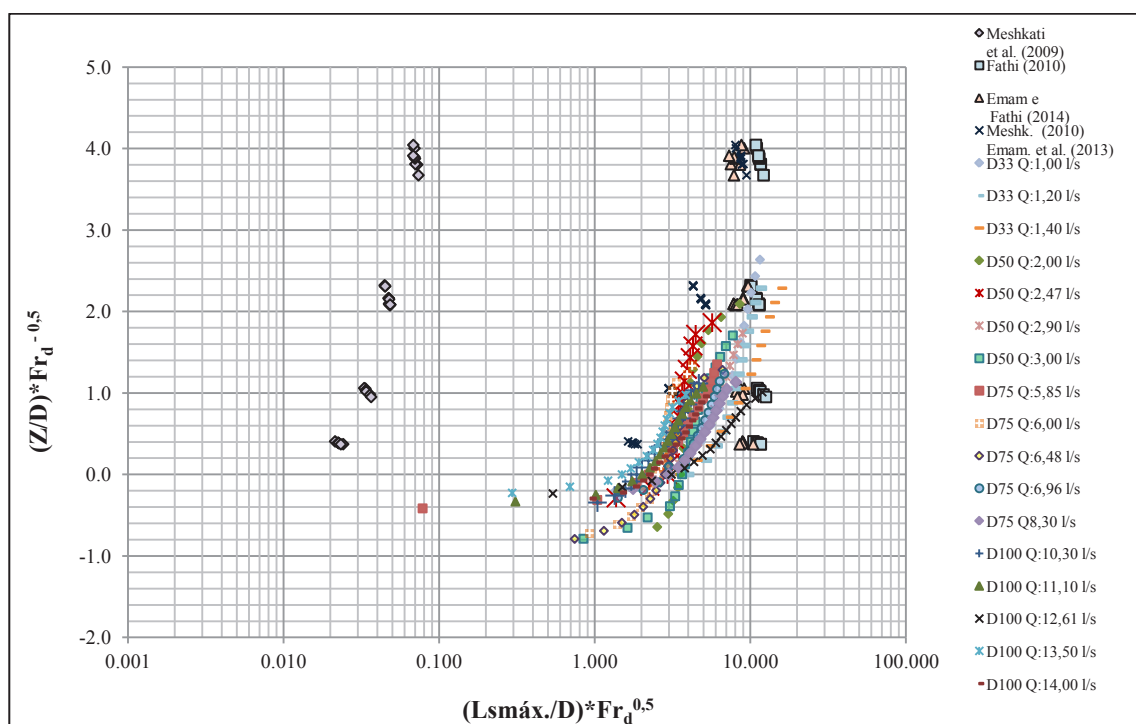
Onde:

$L_{smáx.}$  é o comprimento máximo de remoção do sedimento (m);  $D$  é o diâmetro do orifício (m);  $Fr_d$  é o número de Froude (adm) a montante de descarga de fundo considerando o parâmetro  $D$ ;  $Z$  é a cota máxima de sedimentos a partir da geratriz inferior do orifício (m);  $A$  e  $B$  são parâmetros de ajuste dos adimensionais propostos (adm).

Estes adimensionais consideram as características do cone de remoção, tais como, cota de sedimentos ( $Z$ ), comprimento máximo do alcance de remoção ( $L_{smáx.}$ ) e os diâmetros dos descarregadores de fundo ( $D$ ) e o Número de Froude na entrada do descarregador. As correlações foram definidas através da estimativa de seus respectivos coeficientes de ajuste, “A” e “B”, nos valores de 0,5 e -0,5, para os eixos “x” e “y”, Figura 5.



**Figura 5.** Adimensionais obtidos para os resultados extraídos na simulação físico experimental do modelo reduzido dos descarregadores de fundo, nos diâmetros de 33, 50, 75 e 100mm. Fonte: Autores (2018).



**Figura 6.** Resultados adimensionalizados obtidos dos ensaios realizados em laboratório (LOH) e das equações disponíveis em literatura. Fonte: Autores (2018).

Analisando os dados obtidos dos ensaios realizados em laboratório e os dados de  $L_{smáx.}$  extraídos das equações disponibilizadas em literatura percebe-se uma proximidade entre o comportamento das séries de dados teóricos gerados e os adimensionais desenvolvidos neste estudo, conforme Figura 6.

Os resultados de maior similaridade foram os obtidos por Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014). Possivelmente, isto pode ser justificado pela proximidade das massas específicas dos materiais utilizados pelo autor ( $\rho_{wb} = 1,230$  a  $1,405 \text{ kg/m}^3$ ) em relação ao peso específico do material usado nos ensaios deste estudo ( $\rho_s = 1,080 \text{ kg/m}^3$ ). Outro aspecto relevante



foram as diferenças entre as relações de altura de lâmina d'água ( $H_W$ ) e altura do depósito de sedimentos ( $H_S$ ) serem muito superiores as relações de  $H_S/H_W$  obtidas na campanha de ensaios no modelo reduzido instalado no LOH.

O comportamento apresentado na verificação das adimensionalizações estabelecidas para os  $L_{smáx}$  definidos por Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013) e Fathi-Moghadam (2010) foram próximos aos definidos nos ensaios realizados em laboratório. Ambas as formulações baseiam-se nos diâmetros das descargas de fundo e, indiretamente, na velocidade do escoamento.

Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013) não apresentaram em sua definição as características referentes ao material ou a estrutura utilizada nas simulações que originaram as informações de seu equacionamento, porém as estimativas geradas de  $L_{smáx}$  detinham maior correlação do que os resultados obtidos por Meshkati et al. (2010). Este apresentou semelhanças entre as faixas de diâmetro dos descarregadores e as vazões de ensaio, de 0,14 a 14,0 l/s, das quais foram definidas a previsão do alcance máximo de remoção de sedimentos, próximo aos estabelecidos na campanha de ensaios realizada no LOH.

Durante as verificações dos novos adimensionais para os dados considerados a partir de Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) e Meshkati et al. (2010) pode-se observar que as relações de cota e diâmetro ( $Z/D$ ) não representam um fator condicionante para a determinação do comprimento máximo do alcance de remoção do material depositado junto as estruturas das barragem e seus reservatórios. Outro aspecto relevante foram as diferenças encontradas na verificação das adimensionalizações estabelecidas por Fathi-Moghadam et al. (2010) e Meshkati et al. (2010), uma vez que ambas, mesmo considerando em suas formulações relações de massa específica, utilizaram em seus ensaios materiais de densidades distintas, de 2,65 e 1,80 (g/cm<sup>3</sup>), respectivamente.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante a verificação das estimativas dos  $L_{smáx}$  extraídos pelas equações de Meshkati et al. (2010), Meshkati et al. (2010) apud Emamgholizadeh et al. (2013), Fathi-Moghadam et al. (2010) e Emamgholizadeh e Fathi-Moghadam (2014) observou-se a necessidade da inserção de novos parâmetros adimensionais ao estudo, uma vez que a massa específica seria uma das possíveis justificativas das diferenças encontradas entre as séries de dados experimentais e as estimadas através de literatura, principalmente quando comparados aos resultados obtidos em Meshkati et al. (2010).

A determinação da similaridade observada na geometria da cava do depósito de sedimentos tornou-se um dos resultados importantes deste estudo uma vez que norteará novas pesquisas para a determinação da largura máxima a ser atingida pela fossa formada, servindo assim de subsídio para o aperfeiçoamento de novos parâmetros que generalizem ambas as dimensões  $L_{smáx}$  e  $W_{ss}$ .

Os adimensionais previstos, conforme Equação 2 e Equação 3, expressam boas correlações entre os parâmetros utilizados por diferentes autores, sendo o diâmetro das estruturas dos descarregadores de fundo e as condições do escoamento (estas representadas através do Número de Froude acrescentado em ambos os adimensionais) importantes parâmetros a serem utilizados na representação do processo de formação do cone de remoção de sedimentos junto aos descarregadores de fundo. Evidencia-se, porém, a necessidade da inserção de parâmetros que avaliem as características dos sedimentos, tais como granulometria e peso específico do material.

As diferenças expressas entre o comportamento dos adimensionais desenvolvidos neste estudo e os resultados encontrados a partir da estimativa de alcance da remoção de sedimentos propostos por outros autores evidenciam a necessidade de inserção e ajuste de novos parâmetros adimensionais, baseados principalmente nas relações de massa específica e altura de lâmina d'água, além da aplicabilidade em casos reais para sua efetiva validação.

Além disso, recomendam-se novos estudos para adequação dos coeficientes de ajuste “A” e “B”, conforme sejam acrescentados informações de novos ensaios ou mesmo novos parâmetros

adimensionais que considerem a inserção das características dos materiais utilizados como sedimentos de fundo, informação relevante principalmente para a generalização entre modelos e protótipos.

Vale salientar a importância da continuidade dos estudos em laboratório por meio da realização de ensaios com materiais de diferentes pesos específicos, assim como propostas de novos posicionamentos e geometrias de estruturas que ampliem a área de influência da remoção de sedimentos pelos descarregadores de fundo, de maneira a aumentar a eficiência do processo de desassoreamento em distintas condições de campo e em diferentes reservatórios utilizados para a geração de energia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições e empresas que contribuíram com apoio financeiro parcial para realização da pesquisa relacionada ao presente artigo, sendo elas a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/Brasil), a Eletrobras/Furnas, a Fundação de Apoio Universitário (FAU/UFPel), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS/Brasil), a UFRGS e ao IPH/UFRGS e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batua D.G., Jordaan J.M.Jr. (2000) *"Siltting and desilting of reservoirs"*. CRC Press
- Brandt, S. A. (2000) *"Reservoir desiltation by means of hydraulic flushing"*. [S.l.]: [s.n.].
- Emamgholizadeh S., Bina M., Fathi-Moghadam M., Ghomeyshi M. (2006). *"Investigation and Evaluation of the Pressure Flushing Through Storage Reservoir"*. ARPN. Journal of Engineering and Applied Sciences 1(4), pp. 7-16.
- Emamgholizadeh S., Fathi-Moghadam M. (2014) *"Pressure Flushing of Cohesive Sediment in Large Dam Reservoirs"*. ASCE. Journal of Hydrologic Engineering 19(4), pp. 674-681.
- Emamgholizadeh S., Bateni S.M, Jeng D.S. (2013). *"Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry"*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, n. 26, pp.2551-2558.
- Fathi-Moghadam M. et al. (2010) *"Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment"*. Journal of Hydraulic Research, v. 48, n. 4, pp.509-514.
- Madadi M.R., Rahimpour M., Qaderi K. (2016). *"Sediment flushing upstream of large orifices: An experimental study, in Flow Measurement and Instrumentation"*. 52, pp.180-189.
- Mahmood, K. (1987). *"Reservoir sedimentation: impact, extent, and mitigation"*. [S.l.]: [s.n.].
- MME, M. De M. E E. (2015). *"Balanço energético nacional"*. [S.l.]: [s.n.].
- Meshkati M.E., Dehghani A. A., Naser G., Emamgholizadeh S., Mosaedi A. (2009). *"Evolution of Developing Flushing Cone during the Pressurized Flushing in Reservoir Storage"*. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, Vol.3, No 10, pp.355-359.
- Morris, G. L. Fan J. (1998) *"Reservoir Sedimentation Handbook"*. [S.l.]: [s.n.].
- Saraiva L.S., Abreu A.S., Silveira D.S., Desessards F.P., Ferla R., Dai Prá, M., Teixeira E.D., Endres L.A.M., Marques M.G., (2017). *"Previsão do Alcance da Remoção de Sedimentos por Descarregadores de Fundo de Pequenas Barragens"*. 13º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal.
- Talebbeydokhti N., Naghshineh A. (2004). *"Flushing Sediment Through Reservoirs"*. Iranian Journal of Science & Technology, Dept. of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, I. R. of Iran. Transaction B, 28(B1), pp. 119-136.